

各種非破壊試験法による低強度コンクリートの 強度推定方法に関する研究

谷川恭雄*¹ 木股典良*¹ 西川奈津子*² 山根政夫*²

*¹名城大学 理工学部建築学科(〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501)

*²(株)構造総研 技術開発室(〒542-0012 大阪府大阪市中央区谷町9-2-29)

要旨：重要文化財や登録文化財に指定されているような歴史的コンクリート構造物では、圧縮強度が10N/mm²を下回るような低強度コンクリートが使用されている場合が多い。そのため、本研究では、P型リバウンドハンマー法、超音波速度法、ウィンザーピン貫入抵抗法および引っかき傷法による低強度コンクリートの強度推定方法について検討した。実験の結果、上記4種類の試験方法による強度推定精度は、引っかき傷法が最も高く、以下、超音波速度法、ウィンザーピン貫入抵抗法、P型リバウンドハンマー法の順となった。ただし、P型リバウンドハンマー法については、何らかの方法で水セメント比や材齢がわかれば、強度推定精度が大幅に向上することが明らかとなった。

キーワード：低強度コンクリート、非破壊試験法、反発度法、超音波速度法、ウィンザーピン貫入抵抗法、引っかき傷法

1. まえがき

重要文化財や登録文化財などに指定されているコンクリート構造物では、強度が10N/mm²を下回るような低強度コンクリートやジャンカなどの多い劣悪コンクリートが使用されている場合が多く見られる。また、歴史的建造物では、コアなどの試料の採取が許されない場合が多いため、使用材料の性質を把握するには非破壊試験法に依存することになるが、このような低強度コンクリートを対象とした非破壊試験方法に関する系統的な研究はあまり報告されていない^{1)~6)}。

そのため、本研究では、P型リバウンドハンマー法(反発度法)、超音波速度法、ウィンザーピン貫入抵抗法⁴⁾および引っかき傷法¹⁾による低強度コンクリートの強度推定方法について検討することとした。

Table 1 Properties of materials used

| Kind | Type (Properties) |
|--------|---|
| Cement | Ordinary Portland cement (Density=3.16g/cm ³) |
| Sand | River sand (Density in surface dry condition=2.64g/cm ³ , Water absorption=2.51%, Fineness modulus=2.61) |
| Gravel | Crushed stone (Maximum size=20mm, Density in surface dry condition=2.63g/cm ³ , Water absorption=0.59%, Fineness modulus=6.31) |

2. 実験方法

コンクリートの製作には、Table 1に示す普通ポルトランドセメント、川砂および砕石を使用した。

水セメント比(W/C)は60、70、90および120%の4水準、目標スランプは18cmとした。コンクリートの調合表をTable 2に示す。試験体数は10×10×40cmの角柱体(非破壊試験用)を4個、直径10cm×高さ20cmの円柱体(圧縮、引張試験用)を120個とした。打設後、4日間水中養生し、以後空中養生とした。試験材齢は1週、2週、1ヶ月、3ヶ月および6ヶ月の5水準である。なお、非破壊試験用の角柱体は、端部から10mmの部分で切断し、10×10×30cm角柱体を反発度、超音波速度およびウィンザー

Table 2 Mix proportion of concrete

| W/C(%) | S/a(%) | Unit content(kg/m ³) | | | | Sl. |
|--------|--------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | W | C | S | G | |
| 120 | 49 | 231 | 193 | 883 | 907 | 18 |
| 90 | 47 | 216 | 240 | 840 | 949 | |
| 70 | 47 | 214 | 306 | 848 | 943 | |
| 60 | 47 | 212 | 354 | 807 | 900 | |

[Notes] W/C:Water-cement ratio, S/a:Sand-aggregate ratio, W:Water, C:Cement, S:Sand, G:Gravel, Sl.:Designed slump

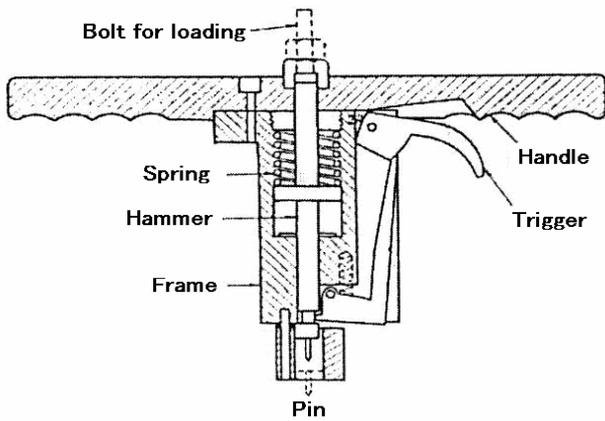


Fig. 1 Apparatus for measuring penetration resistance of Windsor pin

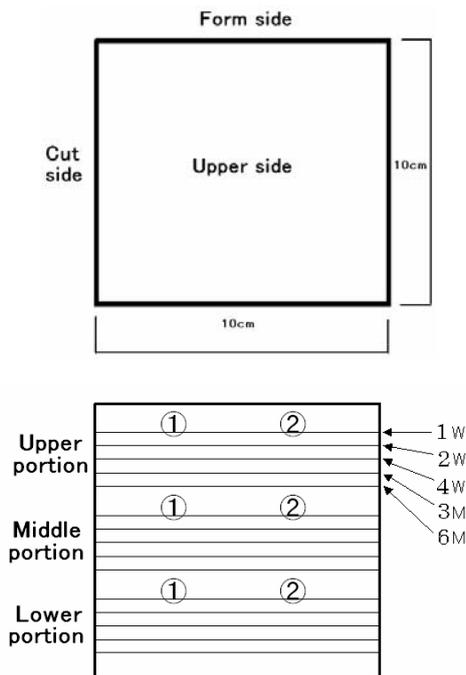


Fig. 4 Measured portion of scratch width

ーピン貫入抵抗値の測定に使用し、10mm 立方体を引っかき傷の測定に使用した。

各試験方法の概要を以下に示す。

2.1 反発度法

万能試験機により、 $2\text{N}/\text{mm}^2$ の一定圧縮応力を試験体の長手方向に载荷した状態で、P型リバウンドハンマーにより反発度を測定した。打設両側面の各5点で反発度を測定し、その平均値を反発度とした。

2.2 超音波速度法

超音波速度測定装置を用いて、 $10 \times 10 \times 30\text{cm}$ 角柱体の両端間3箇所の超音波速度を測定し、その平均値を超音波速度(音速)とした。

2.3 ウィンザーピン貫入抵抗法

ウィンザーピン貫入抵抗装置をFig. 1に示す。バネの力により、直径 3.56mm のピンを被測定体に打ち込み、1インチから貫入深さ(インチ)を引いた値を貫入抵抗値



Fig. 2 Apparatus for scratch test



Fig. 3 Apparatus for measuring scratch width

(無次元数表示)と呼んでいる。反発度法と同様に、試験体に $2\text{N}/\text{mm}^2$ の一定圧縮応力を载荷した状態で、試験体の両側面各5点の貫入抵抗値を測定し、その平均値をウィンザーピン貫入抵抗値とした。

2.4 引っかき傷法

本研究で使用した引っかき傷試験装置をFig. 2に示す。これは、コンクリート面に 9.8N で加圧される引っかき傷試験器(湯浅ら¹⁾が開発し、日本塗り床工業会認定品として市販されている製品)を固定し、その試験器が上部回転ハンドルを回すことにより、ほぼ等速にスライドして引っかき傷を付けるようにしたものである。

引っかき傷幅は、コンクリート面に付けた傷をFig. 3に示すようなCCDカメラを内蔵した装置で撮影し、画像処理を施すことによって測定した。この装置を用いることにより、引っかき傷幅は 0.02mm 単位で自動的に計測することができる。

引っかき傷幅の測定は、ダイヤモンドカッターで切断した面と鋼製型枠に接する面の二つの面で行った。

引っかき傷を付ける長さは約 10cm とし、あらかじめ測定面をパステルで黒色に着色した。

測定箇所は、Fig. 4に示すように、コンクリートの打設高さに対して、上、中および下の部分とし、各材齢ごとに①、②の各 5cm の部分6箇所の平均値を引っかき傷幅とした。

2.5 圧縮・割裂引張試験

各材齢につき、圧縮・割裂引張試験とも各3個の $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱試験体を用いて、圧縮強度と割裂引張強度を求めた。

3. 実験結果とその考察

3.1 反発度法

コンクリートの圧縮強度と反発度の関係を Fig. 5 (材齢別) および Fig. 6 (水セメント比別) に示す (図中の W は週、M は月、R は相関係数を表している)。これらの図より、両者の関係は水セメント比および材齢によって、大きく異なることがわかる。Fig. 5 によれば、同一圧縮強度時の反発度は、材齢が大きいほど大きくなるが、これは試験体中の含水分が小さいほど反発度が大きくなることに起因する。また、Fig. 6 によれば、水セメント比 120% の試験体では、材齢 1 週から 6 ヶ月に至る強度の増加量はわずかであるが、反発度の増加量が大きい。これもコンクリート中の含水量が影響しているものと考えられる。

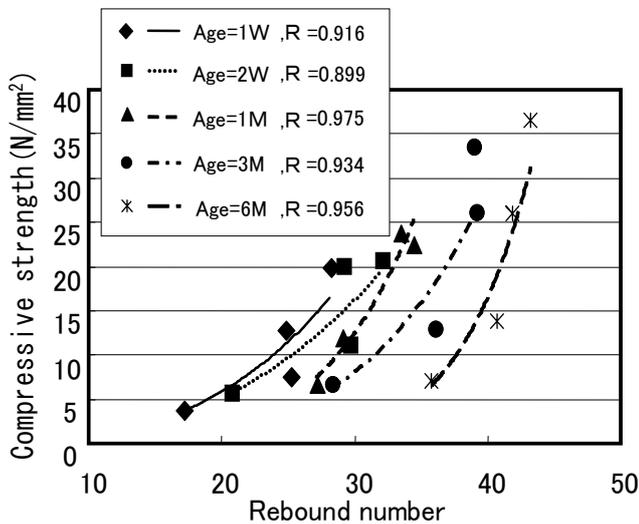


Fig. 5 Relationship between compressive strength and rebound number (Effect of Age)

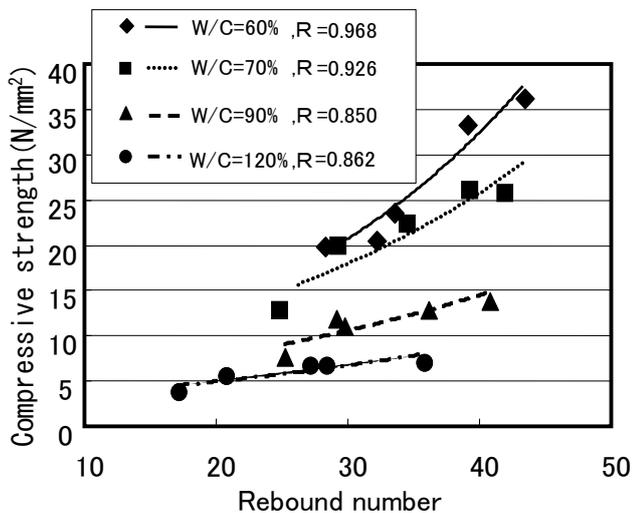


Fig. 6 Relationship between compressive strength and rebound number (Effect of water-cement ratio)

Fig. 7 では、全データと圧縮強度 15N/mm^2 以下の低強度コンクリートのデータに分けて近似曲線を作成し、相関係数を求めた。 15N/mm^2 以下の場合、最も相関係数が高かった累乗式でも 0.719 と低い値であった。反発度法を用いる場合には水セメント比や材齢を知ることが高い推定精度を得るために必要である。また、図中には、日本材料学会 (JSMS) による強度推定式も表示したが、この式による強度推定値は、今回の実験データのほぼ上限値と一致することがわかる。

3.2 超音波速度法

コンクリートの圧縮強度と音速の関係を材齢別に Fig. 8 に示す。線形、多項式、指数、対数、累乗の 5 種類の表示式による相関係数 (R) を比較した結果、最も相関係数が高かったのは指数式であった。図によれば、両者の関係は、材齢によって相違し、同一強度時の音速は、材齢が小さいほど大きくなっている。これは、材齢が小

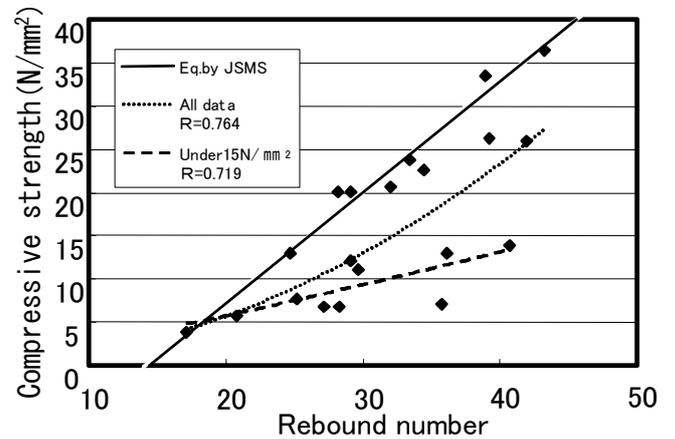


Fig. 7 Relationship between compressive strength and rebound number (Effect of strength level)

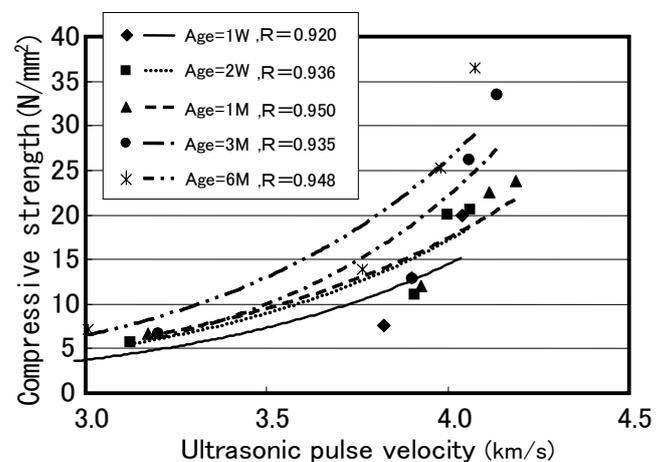


Fig. 8 Relationship between compressive strength and ultrasonic pulse velocity

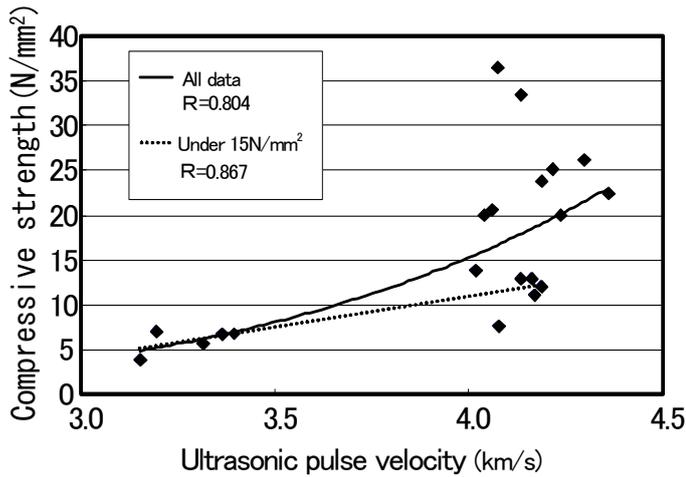


Fig. 9 Relationship between compressive strength and ultrasonic pulse velocity (Low-strength concrete under 15N/mm²)

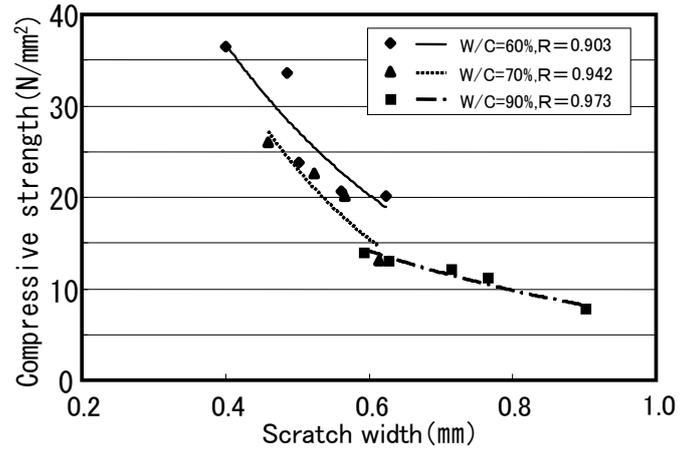


Fig. 12 Relationship between compressive strength and scratch width at cut side (Effect of water-cement ratio)

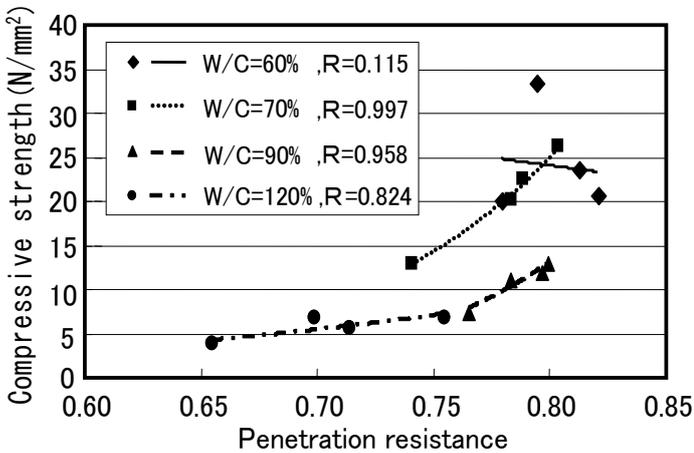


Fig. 10 Relationship between compressive strength and penetration resistance

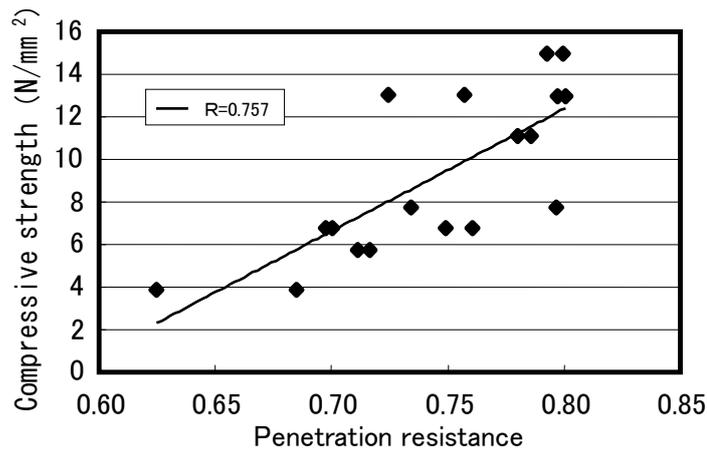


Fig. 11 Relationship between compressive strength and penetration resistance (Low-strength concrete under 15N/mm²)

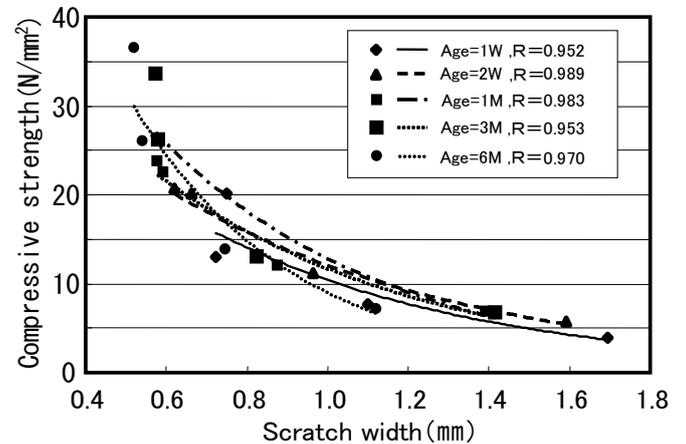


Fig. 13 Relationship between compressive strength and scratch width at cut side (Effect of age)

した。全データを用いた場合の相関係数は0.804となり、水セメント比や材齢を考慮しない場合に比べ、かなり低い値になった。一方、15N/mm²以下のデータを対象とした場合の相関係数は0.867となり、超音波速度法でも低強度コンクリートの強度をかなり高い精度で推定できることが明らかとなった。

3.3 ウィンザーピン貫入抵抗法

コンクリートの圧縮強度とウィンザーピン貫入抵抗値(各材齢ごとの平均値)の関係を Fig. 10 に示す。この図によれば、低強度コンクリートでは、両者の間に相関がみられるが、高強度領域では一定の相関が得られなかった。15N/mm²以下の低強度コンクリートの強度と貫入抵抗値(全データ)との関係を Fig. 11 に示す。ウィンザーピン法は、モルタルには比較的精度よく適用できるが⁴⁾、コンクリートの場合は、ピンが粗骨材に当たる場合が多いため、実験値のばらつきが大きくなる。

さいほど、試験体中の含水分が多いことによるものと思われる。

Fig. 9 では、全データと圧縮強度が 15N/mm²以下の低強度コンクリートのデータに分けて、近似曲線を作成

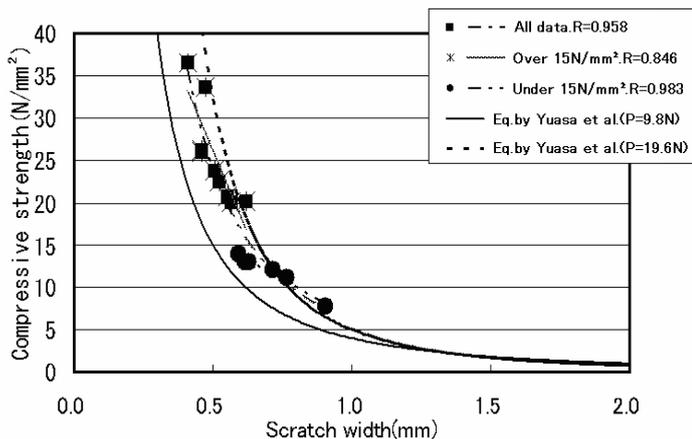


Fig. 14 Relationship between compressive strength and scratch width at cut side

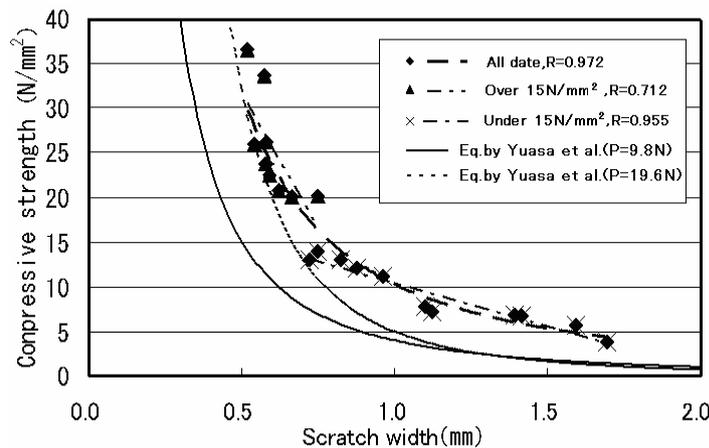


Fig. 15 Relationship between compressive strength and scratch width at form side

3.4 引っかき傷法

Fig. 12 および Fig. 13 にそれぞれ圧縮強度と引っかき傷幅の関係に及ぼす水セメント比および材齢の影響を示す。これらの図によれば、両者の関係は、水セメント比および材齢によって相違するが、それらの影響は反発度や音速の場合ほど大きくないことがわかる。

切断面と型枠面における引っかき傷幅と圧縮強度の関係をFig. 14(切断面)とFig. 15(型枠面)に示す。引っかき傷幅はコンクリートの切断面、型枠面にかかわらず、コンクリートの強度レベルが低くなるにつれて大きくなり、同じ強度レベルでは、型枠面は切断面よりも引っかき傷幅が大きくなる傾向がある。表層部は内部に比べて強度が小さいことが原因と考えられるが、表面状態の違いによる影響を現時点では明確にすることができなかった。また、強度レベルが 15 N/mm²以上と 15 N/mm²以下の範囲で両者の関係式が異なることが明らかになった。Fig. 14 とFig. 15 には、湯浅ら¹⁾による推定式も併示したが、切断面における本実験結果は、定圧力(P)=19.6N時の湯浅らによる式とほぼ同様の傾向を示している。

市販されている引っかき傷試験器を今回開発した定速送り装置に取り付けることにより、一定の針圧と速度でコンクリートを引っかくことができるようになった。さらに、引っかき傷幅測定用の光学式計測器を用いることにより、引っかき傷幅を人為差なしに、瞬時に測定することが可能になった。以上により、今回開発した計測システムを使用することによって、個人差のない計測結果を導き出すことができる。

4. まとめ

本研究では、4種類の非破壊試験法を用いて低強度コンクリートの強度推定方法に関する一連の実験を行った。本実験によって得られた圧縮強度が 15N/mm²以下の低強度コンクリートのデータを、実用性を考慮して直線式で表示した場合の各非破壊試験法による強度推定式Table

3に示す。

この表によれば、強度推定精度は引っかき傷法が最も高く、以下、超音波速度法、ウィンザーピン法、反発度法の順となった。ただし、反発度法については、何らかの方法で水セメント比や材齢がわかれば、強度推定精度を大幅に向上させることができる。

Table 4 は、本実験で用いた4種類の非破壊試験法の特徴を、装置の価格、試験の難易度、被測定物の表面状態、試験後の表面状態および強度推定精度の観点から比較したものである。歴史的構造物では表面に一切の傷を付けてはならないという場合も多いため、個々のケースに応じて適用する非破壊試験法を選択する必要がある。

なお、本研究では、歴史的コンクリート構造物への非破壊試験法の適用性について検討することを目的としているにもかかわらず、コンクリート材齢が6ヶ月までのデータしか取り扱ってない。現在、低強度コンクリートの長期材齢下の性状に関する実験を継続中であり、それらの結果については順次報告する予定である。

Table 3 Estimation equation and coefficient of correlation of compressive strength of low-strength concrete

| Test method | Measured side | Estimation eq. | Coefficient of correlation (R) |
|----------------------------------|---------------|------------------------|--------------------------------|
| Rebound hammer method | — | $F_c = 0.328R - 0.194$ | 0.652 |
| Ultrasonic pulse velocity method | — | $F_c = 6.77V - 16.2$ | 0.867 |
| Windsor pin penetration method | — | $F_c = 57.4W - 33.6$ | 0.757 |
| Scratch method | Form side | $F_c = -9.67D + 20.1$ | 0.955 |
| | Cut side | $F_c = -18.3D + 24.7$ | 0.983 |

Table 4 Comparison of various test methods

| Item | P-type hammer method | Ultrasonic pulse velocity method | Windsor pin penetration method | Scratch method |
|--|--|----------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Cost of apparatus | a little expensive | expensive | expensive | cheap |
| Degree of difficulty of test | easy | easy | a little difficult | easy |
| Surface condition of material measured | smooth surface | smooth surface | no regard | smooth surface |
| Surface state of material after test | slight hollow | mark of grease | about 4mm hole | about 1mm line mark |
| Accuracy of estimation of strength | bad (good if water-cement ratio and age are known) | remarkably good | a little bad | good |

[Notes] Fe:Compressive strength[N/mm²], R:Rebound number, V:Ultrasonic pulse velocity[km/s]
W:Penetration resistance of Windsor pin, D:Scratch width[mm]

謝辞：

本研究の実施に際して、ウィンザーピン装置を貸与していただいた名古屋市立大学・青木孝義准教授、実験時に協力を得た名城大学卒業生・鳥居卓郎君および中森啓介君に謝意を表します。

参考文献：

1) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇、篠崎幸代：引っかけ傷によるコンクリートの圧縮強度試験方法の提案、日本非破壊検査協会シンポジウム「コンクリート構造物の非破壊検査への期待」論文集、Vol. 1、pp. 115-122 (2003)
2) 畑中重光、和藤浩、谷川恭雄：劣悪コンクリートの簡易診断に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No. 573、pp. 29-35 (2003)

3) 和藤浩、王晓梅、畑中重光：劣悪コンクリートの強度推定に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 19、No. 2、pp. 357-362 (1997)
4) 宮部喬司、谷川恭雄、森博嗣、黒川善幸：ウィンザーピン法によるモルタルの強度推定に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、第 26 巻、第 1 号、pp. 1833-1838 (2004)
5) 宮部喬司、青木孝義、森博嗣、黒川善幸、谷川恭雄：消石灰モルタルの力学的性状と非破壊検査法に関する研究、日本建築学会東海支部研究報告集、第 43 号、pp. 29-32 (2005)
6) 長谷川哲也、畑中重光、谷川恭雄：削孔式表層強度試験器によるセメント硬化体の強度評価、コンクリート工学年次論文集、Vol. 28、No. 1、pp. 1877-1882 (2006)

STRENGTH ESTIMATION OF LOW-STRENGTH CONCRETE BY VARIOUS NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS

Yasuo TANIGAWA*¹, Noriyoshi KIMATA*¹, Natsuko NISHIKAWA*² and Masao YAMANE*²

*1 MEIJOU UNIVERSITY, Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology
(1-501, Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya-shi, Aichi 468-8502, Japan)

*2 KOUZOUSOUKEN CORPORATION, Div. of Technical Development (9-2-29, Tanimachi,
Chuo-ku, Osaka-shi, Osaka 542-0012, Japan)

ABSTRACT: Low-strength concrete under about 15N/mm^2 has been often used in historical RC buildings, and in many historical buildings, sampling of concrete cores is prohibited.

In the present paper, various non-destructive testing methods such as P-type rebound hammer method, ultrasonic pulse velocity method, Windsor pin penetration method and scratch method are applied for estimating the strength of low-strength concrete.

It is conformed based on the experimental results that the highest accuracy of strength estimation is obtained by the scratch method and the higher accuracy can be obtained by the rebound hammer method when the water-cement ratio and the age of concrete are known by other methods.

KEY WORDS: Low-strength concrete, Non-destructive testing method, Rebound hammer method, Ultrasonic pulse velocity method, Windsor pin penetration method, Scratch method